

# 折りたたみ可能な切開辺を含む軸対称形状の設計

加瀬 悠人<sup>1</sup>, 三谷 純<sup>1</sup>, 福井 幸男<sup>1</sup>, 金森 由博<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 筑波大学

e-mail : kase@npal.cs.tsukuba.ac.jp

## 1 はじめに

立体を折りたたむことは、使用しない時に小さい収納スペースに格納し、必要に応じて大きく広げることを実現するために必要な技術である。本研究では、軸対称な立体モデルを対象とし、平坦に折りたたみ可能な多面体モデルの構築を実現する。折りたたみ方法は、平らなプレートで上から下に押しつぶす操作で実現する。モデルの形状は平面多角形の集合で表されるものとし、水平な辺はヒンジによって接続されて折れ角を変更でき、それ以外の辺は折りたたみ時には分離し、元の立体形状を成すときに接合される構造を持つものとする(図3)。

## 2 関連研究

折りたたみ可能な構造については、折り紙の分野で広く研究がされている。剛体パネルをヒンジで連結した構造で全体の形状を表現するものを剛体折りと呼び、歪みなく折り操作を行えるための条件を満たす形状設計手法が館<sup>[1]</sup>によって提案されている。また、軸方向に折りたたむことができる円錐状の殻構造の設計手法が野島<sup>[2]</sup>によって提案されている。

しかし、どちらの手法も辺を切開することを許容しないため形状の自由度が小さい。よって、本提案手法は切開辺を許すことで形状の自由度を高くする。

## 3 提案手法

本研究ではユーザが入力した折れ線を断面を持つような、軸対称な立体を対象とする。実際には、入力した通りの折れ線では平坦に折りたためないことが多いため、折りたたみ可能になるように断面線の修正を行う。また、ヒンジ構造を持たせる辺での折り曲げ方向により、折りたたみ易さに影響がでるため、この折り曲げ方向の割当についても考慮する。最終的に、折りたたみ可能な立体データと、各辺の折り曲げ方向に関する情報を出力する。

## 3.1 対象とする立体の断面線

対象とする立体は、軸方向から見ると正N角形を成し、合同なN個の平坦折り可能なパーツの組み合わせで構成される(図3ではN=5)。幾何学的対称性から、立体の折りたたみを断面の折りたたみ(2次元平面での1次元の折れ線の折りたたみ)の問題として考えることができる。対象とする軸対称な立体モデルを生成するために、ユーザはスクリーン上をクリックして、断面を構成する折れ線を入力する。

この折れ線の頂点数が $n+1$ であるとき、辺の数は $n$ となる。以降、 $i$ 番目の辺 $E_i$ の長さを $l_i$ で表す。

## 3.2 折りたたみ可能な折れ線の条件

各辺 $E_i$ を、隣接する辺との連続性を保ちながら水平に配置することで、平坦に折りたたんだ状態を作ることができる。この際、法線は上または下のどちらかを向くため、折りたたみ方は全部で $2^n$ 通りある。しかし、対象とする立体の幾何学的な制約から、各頂点は式(1)および式(2)を満たさなくてはならない。

$$P_i(x) > P'_i(x) \quad (1)$$

$$\sum \delta_i l_i = 0 \quad (\delta_i = \{-1, 1\}) \quad (2)$$

式(1)の $P_i(x)$ は折りたたみ前の $i$ 番目の頂点の $x$ 座標、 $P'_i(x)$ は折りたたみ後の $x$ 座標である。この条件を満たさない場合、折りたたむときに隣接するパーツと干渉する問題が発生する。式(2)の $\delta_i$ は、辺 $E_i$ の法線が上を向いているときに1を、下を向いているときに-1の値を取るものとする。この条件を満たすときのみ、折りたたみ後に $P'_0$ と $P'_{n+1}$ の位置が一致する。しかし、実際にはすべての可能な折りたたみ方を調べても式(2)を満たすものは存在しないことが多いため、式(2)を満たすよう辺の長さの調整を行う。

### 3.3 評価値の導入

式(1)を満たす折りたたみ方の中から、もっとも優れた折りたたみ方に対し、式(2)を満たすような辺の調整を行う。ここでは、スムーズに折りたたみが行える折り方を優れた折り方とし、折りたたみの前後で辺の向きの変化や折れ角の変化を小さく抑えることを目的とした評価値1)、2)を導入する。また、後工程で条件式(2)を満たすように辺の長さを調整することになるため、この調整のための誤差を評価値3)とした。

各評価値は値が小さいものほど優れているとする。

- 1) 折りたたみ前後での各辺の向きの変化量の総和。
- 2) 折りたたみ前後での各折れ点での向き(山・谷)の変化量の総和。
- 3) 式(2)の左辺の値(以降ではこの値を *gap* と呼ぶ)の絶対値。

これら3つの評価値にそれぞれ重みを付け、その線形和が最小となる折りたたみ方を選択する。

### 3.4 頂点位置の調節

選択された折りたたみ方に対して、*gap*の値が0になるように、頂点の位置を調整する。その際、入力形状からの変化を少なく抑えるために、最長となる辺を選択し、選択された辺の長さが *gap* だけ小さくなるように、辺の端点の位置を変更する。これにより、条件式(2)が満たされる。

## 4 結果

提案手法を実装したシステムで、ユーザが入力した断面線を折りたたみ可能な形状に調整した結果を図1, 2に示す。それぞれ赤丸で囲まれた辺の長さを調節した。

図1の例は *gap* が小さかったため、辺の長さの調節が小さく、形状の変化はあまりなかった。図2の例は *gap* が大きく、形状が大きく変化した。図3は、図1の結果に基づいて試作した立体模型である。5つのパーツそれぞれが平坦に折りたたまれることで、立体全体を平坦にすることができた。

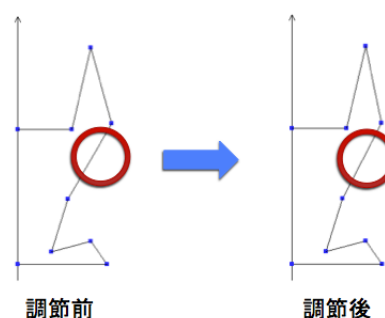


図 1. 形状の変化が小さい例

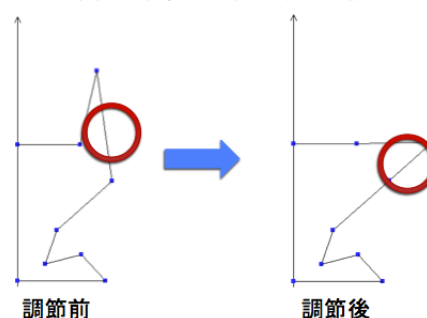


図 2. 形状の変化が大きい例

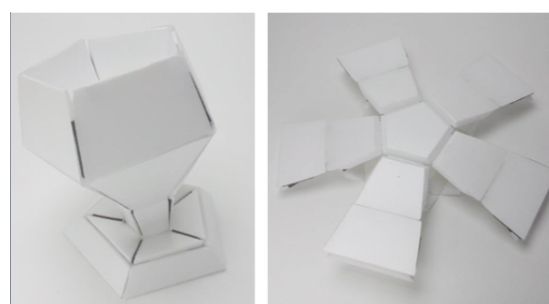


図 3. 試作例

## 5 終わりに

本研究では、折りたたみ可能な切開辺を含む軸対称形状を設計するための手法を提案した。本提案手法では、図2のように、形状が大きく変化してしまう場合があった。原因は、*gap* が大きいときに1つの辺の長さを変えることで対応していることにある。この問題は各辺の長さを一定の比率で変更することで対応可能だと考えられる。

## 参考文献

- [1] 舘 知宏, 四辺形メッシュに基づく剛体折紙デザイン手法, シミュレーション, 29巻3号(2010-9), 24-29.
- [2] 野島 武敏, 折りたたみ可能な円錐殻の創製, 日本機械学会論文集(C編), 66巻647号(2007-7), 349-355.